

# HY-2卫星双频GPS精密定轨技术

林明森<sup>1</sup>, 王晓慧<sup>1</sup>, 彭海龙<sup>1</sup>, 赵齐乐<sup>2</sup>, 李敏<sup>2</sup>

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 武汉大学, 武汉 430072)

**[摘要]** 海洋二号(HY-2)卫星双频全球定位跟踪系统(GPS)接收机获取的GPS数据是基于非差简化动力学方法应用于HY-2卫星精密轨道确定。差分GPS载波相位数据可以消除钟差,同时利用GPS数据获得HY-2卫星轨道和GPS卫星轨道。GPS数据确定的轨道利用激光测距进行了检核,并与法国太空总署确定的轨道以及综合定轨策略确定的轨道进行了比较, HY-2卫星基于GPS数据精密轨道径向成分优于3 cm。

**[关键词]** 精密定轨; GPS; 多普勒雷达和无线电定位组合系统(DORIS); 卫星激光测距(SLR)

**[中图分类号]** V529 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)06-0097-05

## 1 前言

2011年8月16日发射的海洋二号(HY-2)卫星对全球海洋动力环境的长期、连续、高精度的动态监测,提供高精度的海面风场、海面高度和海面温度等数据产品。HY-2卫星轨道为太阳同步近圆形轨道,轨道高度为963 km和965 km,轨道倾斜角为99.34°。与其他高度计卫星类似,轨道径向误差是高度计观测主要误差源,事实上轨道误差是构成高度计误差预算的主要组成部分。HY-2卫星事后精密轨道径向精度预算指标为10 cm。

双频全球定位系统(GPS)数据应用于低轨卫星轨道确定将近30年了,目前这项技术在国际上已经得到相当可观的发展,已成为TOPEX/Poseidon(T/P)、ENVISAT、Jason-1和Jason-2等卫星主要厘米级定轨手段之一<sup>[1~4]</sup>。HY-2卫星搭载的双频GPS接收机为国内自主研发,双频GPS精密定轨作为HY-2卫星的主要定轨方案之一,本文分析了双频GPS接收机基本性能,并给出了初步双频GPS定轨精度结果。

## 2 星载GPS精密定轨原理及策略

### 2.1 星载GPS精密定轨原理

基于GPS的HY-2卫星精密轨道确定采用非差简化动力学方法。精密定轨方法一般包括动力学(dynamic solutions)、简化动力学(reduced dynamic solutions)以及运动学(kinematic solutions)定轨策略,其中简化动力学定轨策略实际上就是纯动力学定轨和运动学定轨两种极限情况的一种中间策略,该方法充分利用卫星的几何和动力学信息,在定轨过程中使用卡尔曼滤波器,通过将没有建模或模型不准确的加速度当作平稳的随机过程(一般为一阶Gauss-Markov过程模型),以此来解释观测的卫星轨道与预计的卫星轨道之间的偏离;一般来讲,简化动力学定轨方法寻求的是将局部的几何观测值改正到动态确定的、收敛的轨道解上去,从而最大限度地利用可观测性。由于GPS系统的特点是可以全天候获得高精度的卫星星历,采用简化动力学方法可以充分利用观测数据。GPS数据非差处理只需要HY-2卫星本身的GPS接收数据,采用非差

**[收稿日期]** 2014-04-09

**[基金项目]** 国家高技术研究发展计划(863计划):海洋动力环境微波遥感信息提取技术与应用(2013AA09A505);海洋公益性行业科研专项经费项目“自主海洋动力环境卫星微波遥感处理技术研究示范”(201105032)

**[作者简介]** 王晓慧,1968年出生,女,黑龙江绥化市人,博士,副研究员,主要研究方向为卫星精密定轨;E-mail: xhwang@mail.nsoas.gov.cn

状态估计和非差模糊度固定进行参数估计。非差状态估计是计算非差观测数据的观测量减去计算量(OMC)及对待估参数的偏导数,然后组成本方程,对失效参数进行预测消除,对最终组成的法方程进行解算,并恢复残差和随机参数估计值。非差模糊度固定是在以非差方式进行定轨与定位数据处理

中,对非差模糊度形成的双差模糊度进行整数固定,固定的双差整周模糊度作为虚拟观测值,引入观测方程与法方程,提高定轨与定位精度。非差模糊度固定是提高定轨与定位精度的关键技术之一。

## 2.2 HY-2卫星双频GPS定轨流程

GPS精密定轨软件流程如图1所示。

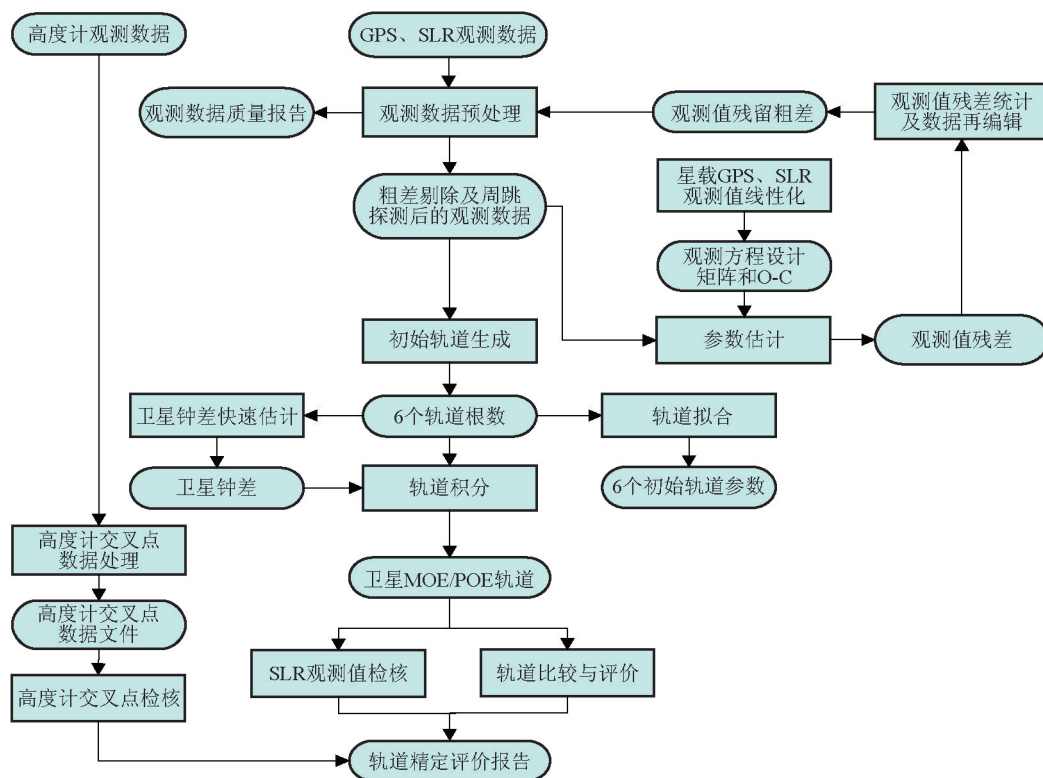


图1 GPS精密定轨软件流程图

Fig. 1 The diagram of the precise orbit determination for GPS solution

GPS观测数据进行数据预处理,并进行评价直到获取粗差别除及周跳探测后的观测数据,调用轨道积分器获取卫星位置以及动力学偏导数,同时调用误差模型改正模块,线性化模块获取几何偏导数和预测残差,最后输入非差参数估计模块并调用非差模糊度固定模块进行参数估计;然后调用数据编辑模块,将估计模块生成的验后残差输入数据再编辑模块,获取粗差和周跳探测信息;然后进行初始轨道生成,得到轨道根数,进行卫星轨道拟合,获取6个初始轨道参数;轨道根数进行轨道积分,获取卫星轨道。

## 2.3 星载双频GPS定轨策略

HY-2卫星精密定轨解算的两类轨道:中等精度轨道星历(medium accuracy orbit ephemeris, MOE)和精密轨道星历(precise orbit ephemeris, POE)。MOE弧长30h,相邻弧段重叠2h,时效延迟26h;POE弧长7天,相邻弧段重叠4h,时效延迟30天。

表1给出了在MOE和POE轨道确定中所采用力模型、数据和待估参数,其中MOE和POE轨道除数据处理时间段有所不同外,其他差异主要在所采用的GPS轨道和钟差产品不同,MOE定轨采用本软件解算的超快速GPS轨道和钟差,而POE则采用欧洲定轨中心(CODE)提供的精密轨道和钟差。

表 1 HY-2 卫星 GPS/SLR 精密定轨策略  
Table 1 GPS solution for POD of HY-2 satellite

力模型	
平均重力场	EIGEN-GL04C(零潮模型,100×100阶)
地球重力场低阶项长期变化	IERS Conventions 2003
三体引力	JPL DE405 行星星历
地球固体潮	IERS Conventions 2003
海潮	FES2004 海潮模型(30×30阶)
相对论效应	IERS Conventions 2003
大气阻力	DTM94 大气密度模型
太阳光压	Box-Wing 模型
参考框架	
惯性参考系	J2000.0
岁差和章动模型	IAU 2000A
地球自转	IERS EOP 08 C04(IAU200A)
观测数据	
HY-2 星载 GPS 观测值	非差双频消电离层组合,30 s 采样率,弧段长度为 30 h,相邻弧段重复 6 h
GPS 轨道	POE:CODE 精密轨道 MOE:WHU 超快速钟差
GPS 钟差	POE:CODE 5 s 精密钟差 MOE:WHU 超快速钟差
估计参数	
HY-2 卫星初始状态	三维惯性系位置和速度
载波相位观测值模糊度	每个模糊度弧段、每颗卫星一个
大气阻力系数	360 min/个
HY-2 星载 GPS 接收机钟差	1 历元/个
切向长偏量经验参数	360 min/个
切向、法向和径向 1-CPR 经验参数	360 min/个

图 2~图 4 给出了 2012 年 3 月 HY-2 卫星双频 GPS 数据统计分析结果。图 2 展示了所有观测数据双频完整性统计结果双频完整性为 95.2%,表明双频完整性很好;图 3 中红色、绿色代表的 P1 码、P2 码多路径误差均方差(RMS)分别在 0.765 m 和 0.354 m 左右,多路径效应比较明显;由于形成多路径效应原因比较复杂,尚不能确定具体原因,可以通过努力消除此影响。图 4 统计的是 L1、L2 和 P1、P2 的完整性,统计结果表明 HY-2 星载 GPS 数据中 L2 比 L1 频率数据丢失较多,这主要是由于 GPS 系统设计时 L2 频率信号弱于 L1 频率等原因所致,此项指标反映了接收机的捕获能力。图 5 给出的是定轨中使用的观测数个数,此数据由不同的定轨软件和定轨策略所决定,是定轨分析的一个辅助工具。

从图 5 中发现只有一天的统计个数低于 2 000 个,其他都在 2 000 以上,说明定轨中所使用的观测值个数属于正常范畴。

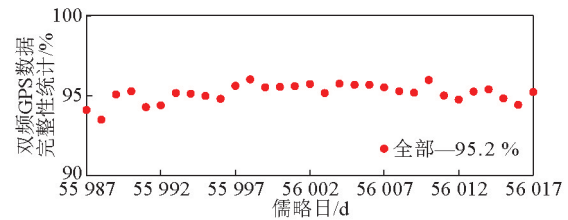


图 2 所有观测数据双频完整性统计

Fig. 2 The statistics of all double-frequency GPS data

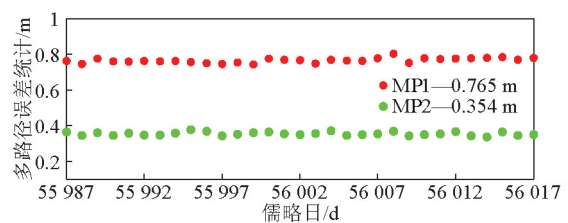


图 3 所有的 P1、P2 码观测值多路径误差统计

Fig. 3 The measurement statistics of all P1 and P2 code

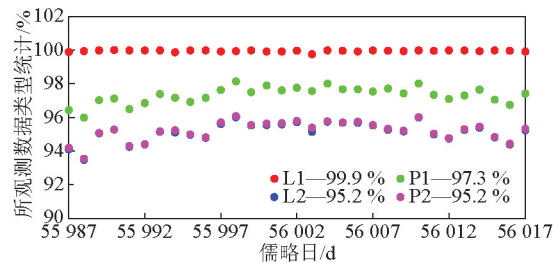


图 4 所有观测数据类型完整性统计图

Fig. 4 The statistics of all types for GPS data

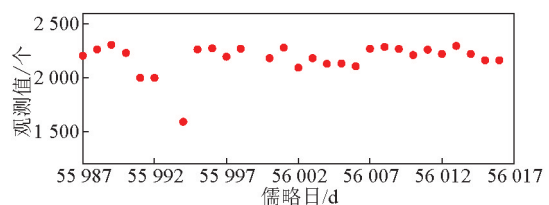


图 5 所有观测值个数统计图

Fig. 5 The statistics of all number of GPS observations

### 3 精密定轨结果及分析

这里采用卫星激光测距(SLR)检核和独立轨道比较两种方法来检验双频 GPS 确定的 2012 年 3 月 MOE 产品的精度。MOE 产品弧长 30 h,相邻轨道

重叠 2 h。

### 3.1 SLR 检核轨道精度

SLR 检验轨道过程中,SLR 残差作为轨道精度评价指标,SLR 残差为 SLR 直接测得的站星距与星载 GPS/DORIS 定轨结果计算得到的站星距之差。

考虑 HY-2 激光数据量,这里采用仰角大于 60° 的激光数据进行检验。

GPS 和法国太空总署 (CNES) DORIS 定轨产品检核结果如图 6 和图 7 所示,同时表 2 也给出两种产品检核结果。

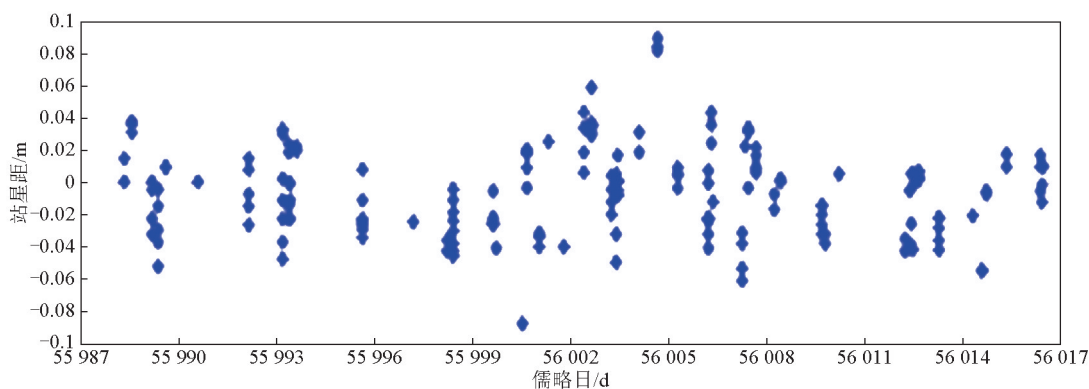


图 6 GPS 定轨产品 SLR 检核结果 (2012 年 3 月 MOE)

Fig. 6 The results of SLR validation for MOE of GPS solution (March, 2012)

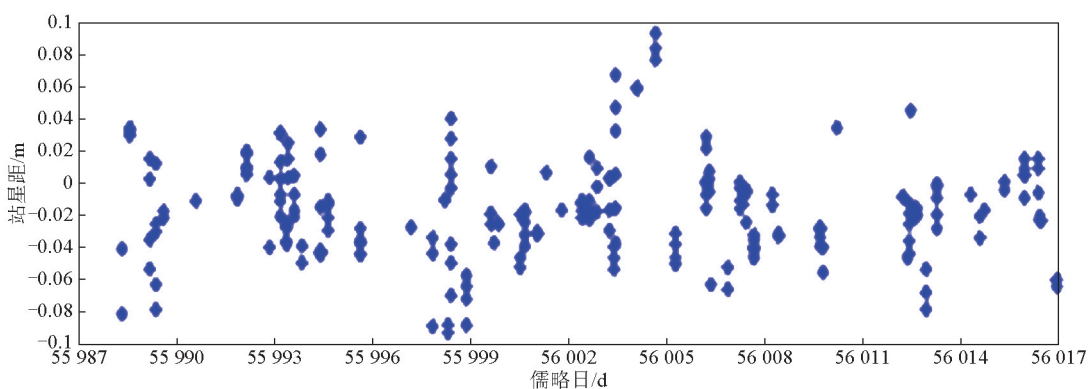


图 7 法国 CNES 产品 SLR 检核结果 (2012 年 3 月 MOE)

Fig. 7 The results of SLR validation for MOE of CNES (March, 2012)

表 2 MOE 径向精度 SLR 检核结果

Table 2 The results of SLR validation for the radial accuracy of MOE

定轨策略	RMS/cm	均值 Mean/cm
DORIS(CNES)	3.43	-1.78
GPS	2.94	-0.57

从 SLR 检核结果看,CNES DORIS 定轨和国内 GPS 定轨的 MOE 精度分别为 3.43 cm 和 2.94 cm。法国 DORIS 定轨产品 MOE 径向精度优于 3.5 cm,国内 GPS 定轨产品优于 3 cm。从结果可以看出,法国 SLR 检核结果均值比较大,直接影响了检核结果。

### 3.2 独立轨道比较

独立轨道是指不同机构采用不同软件计算得

到的两段独立轨道比较,同时也可指采用不同类型观测数据定轨得到的两段轨道之间的比较。这里将 GPS 定轨产品分别与国内 DORIS 定轨、GPS/DORIS 定轨以及法国提供的 DORIS 定轨产品相比较。表 3 给出了 MOE 径向精度独立机构比较结果。

表 3 MOE 径向精度独立机构比较结果

Table 3 The comparison results for different solutions for the radial accuracy of MOE

定轨策略	DORIS(CNES)	DORIS	GPS/ DORIS
径向均方差 RMS(与 GPS 比较)/cm	1.97	2.65	2.02

从比较结果看出, GPS定轨产品与法国 DORIS、DORIS 和 GPS/DORIS 定轨产品比较径向精度分别为 1.97 cm、2.65 cm 和 2.02 cm。独立轨道比较结果显示 GPS 定轨 MOE 径向精度优于 3 cm。

#### 4 结语

通过 2012 年 3 月 GPS 数据统计分析得到 HY-2 卫星双频数据完整性很好, 可达到 95.2%; L1 频率数据丢失很少, 由于 L2 频率信号弱一些, 丢失稍多一些, 但仍达到 95.2%, 反映了其良好的捕获能力; GPS 数据 P1 和 P2 码多路径效应比较明显, 原因有待于进一步分析。

双频 GPS 定轨产品通过 SLR 检核和独立轨道比较两种方法验证, GPS 精密定轨产品精度优

于 3 cm, 与国际水平相当。

#### 参考文献

- [1] Cerril L, Berthias J P, Bertiger W I, et al. Precision orbit determination standards for the Jason series of altimeter missions[J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(S1):379-418.
- [2] Wily Bertiger, Shailen D Desai, Angie Dorsey, et al. Sub-Centimeter precision orbit determination with GPS for ocean altimetry [J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(S1):363-378.
- [3] Cerri L, Berthias J P, Bertiger W I, et al. Precision orbit determination standards for the Jason Series of altimeter missions [J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(S1):379-418.
- [4] Ablain M, Philipps S, Picot N, et al. Jason-2 global statistical assessment and cross-calibration with Jason-1[J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(S1):162-185.

## Precise orbit determination technology based on dual-frequency GPS solution for HY-2 satellite

Lin Mingsen<sup>1</sup>, Wang Xiaohui<sup>1</sup>, Peng Hailong<sup>1</sup>,  
Zhao Qile<sup>2</sup>, Li Min<sup>2</sup>

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. University of Wuhan, Wuhan 430072, China)

**[Abstract]** The global positioning system (GPS) data acquired by the HY-2 satellite GPS receiver have been used in a dynamic orbit determination, which was based on the description of the gravitational and nongravitational forces in the equations of motion. The GPS carrier data were processed in a difference mode to remove clock errors. Simultaneous estimation of the HY-2 satellite orbit and GPS orbit was performed using the data in March (2012). The resulting HY-2 satellite orbits have been compared with the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) orbits and reduced dynamic orbits for GPS/DORIS/SLR strategies, and in the meantime confirmed with SLR validation. The radical component of the GPS orbit was found to agree with better than 3 cm.

**[Key words]** precise orbit determination; GPS; Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite (DORIS); SLR